ChinaXiv合作期刊

基于三维生态足迹模型的天山北麓绿洲生态安全评价

李鹏辉[1]， 徐丽萍[1]， 刘 笑[1]， 吴品儒[2]
（1. 石河子大学，新疆 石河子 832000；2. 130团共青城完全中学，新疆 奎屯 833200）

摘 要：运用改进三维生态足迹模型对2000—2016年天山北麓绿洲生态安全进行评价。结果表明：（1）17 a来天山北麓绿洲的整体生态环境处于不可持续的发展状况，生态占用面积持续增加，生态足迹广度由8.38×10^6 hm^2上升到2.73×10^7 hm^2，平均增速为1.11×10^6 $hm^2\cdot a^{-1}$，生态安全受到严重威胁。（2）2002年后天山北麓绿洲不可持续状况的相对差异逐渐减小，内部各行政单元的人均生态赤字相对差异逐渐缩小。（3）天山北麓绿洲生态利用效率整体上呈现增加趋势，17 a间翻了三番，对于资源的利用程度日趋充分，单位资源创造的经济价值不断增加，但在各年份变化率波动较大，波动幅度在-18.23%～120.84%之间。（4）天山北麓绿洲生态适度人口虽呈现出波动增长趋势，但对于资源的需求和利用也在迅速增加，持续增加的人口规模给生态环境造成巨大压力。最后为缓解生态压力，减小生态赤字，促进天山北麓绿洲的可持续发展提出了建议和对策。

关键词：三维生态足迹；绿洲；生态安全；天山北麓

社会经济的不断发展使得生态系统面临的压力持续增大，而随着物质生活水平的提高，人们对于生态环境又提出了新的要求，经济发展和生态保护二者间的矛盾不断激化[1]。生态安全作为优化人地关系的重要保障，已成为国内外的研究热点。生态足迹理论将复杂的生态经济过程简化为生物生产性空间的供需平衡问题[2]，在国内外已得到广泛认可和应用，其模型也经历了由一维向二维和三维的演进过程[3-5]。三维生态足迹模型作为国际相关研究的最新成果，较传统模型具有明显优势。理论上，三维模型将自然资本存量减少与否作为可持续性的判断依据，实现了自然资本的分类测度；方法上，三维模型是一个表征体积的物理量，由足迹广度和足迹深度相乘得到，实现了生态足迹的纵向拓展；结果上，三维模型是以传统模型结果为基础进行的延伸，足迹广度和深度分别具有空间属性和时间属性，可反映代内公平与代际公平[6]。三维生态足迹模型自引入我国以来，经历了由指标构建、模型修正到应用研究的过程，研究尺度由国家、省域、市县扩展到城市群、流域，研究内容由基础的自然资本核算拓展到生态服务、资源公平、生态建设、旅游、产业系统等可持续发展相关领域[7-9]。近年来，国际上的相关研究主要集中在公众满意度、土地资源利用、空间公平和政策分析等热点问题，而国内研究主要聚焦于模型修正、生态建设和可持续发展战略[10]。如方恺针等[11]针对三维生态足迹模型计算中不同地类生态赤字或盈余抵消问题，将三维模型由地类水平扩展至区域水平，为尊重学术成果，后来研究者多称此为改进三维生态足迹模型。靳相木等[12]针对三维生态足迹模型在足迹深度为自然原长时自然资源流量占用和结余数量未涉及的问题，将足迹深度的取值范围由大于等于1扩展至大于等于0，将生态盈余纳入到三维模型框架中。随着能值理论和净初级生产力在传统生态足迹模型中的广泛应用，Chen等[13]提出基于能值和净初级生产力的新型三维生态足迹模型。

生态安全作为社会经济发展的一项重要议程[14]，受到学者的广泛关注。目前，众多学者以生态足迹理论为指导思想，对区域生态安全和可持续发展展开了大量研究。如陈蓓等[15-17]分别利用生态足迹对川西南高原地区、闽三角城市和湖北省的生态安全展开评价；罗海平等[18]基于生态足迹视角对我国粮食

收稿日期：2019-10-16； **修订日期**：2020-05-03
基金项目：国家自然科学基金项目（31760151）资助
作者简介：李鹏辉（1994-），男，硕士研究生，主要从事可持续发展研究. E-mail: 616275971@qq.com
通讯作者：徐丽萍. E-mail: xlpalw@sina.com

chinaXiv:202012.00028v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202012.00028v1

主产区的粮食生态安全进行时空分析；刘秀丽等[19]利用生态足迹对山西的采煤与脆弱生态复合区的生态安全进行分析预测；杨晓俊等[20]基于生态足迹对西安市的生态游憩空间进行优化。但是以上成果在研究方法上均采用的是传统生态足迹模型，三维生态足迹模型的优势未能得到发挥；且在研究尺度上，多以省、市为研究单元，以绿洲为靶区的研究较少。

天山北麓绿洲是新疆生产、生活集聚和扩散最活跃的地区[21]，同时也是人地关系最敏感的区域。随着社会经济的快速发展，天山北麓绿洲经济发展与生态保护的矛盾进一步激化，但针对其生态安全的研究还较少，且鲜有运用三维生态足迹模型进行的研究。本文构建了符合区域特征的生物生产性账户，采用改进三维生态足迹模型对天山北麓绿洲2000—2016年的生态足迹进行测算和综合分析，引入生态适度人口和生态利用效率等指标分析天山北麓绿洲的生态状况，对其生态安全进行客观评价，并为缓解生态压力提出相应对策。

1 研究区概况

新疆天山北麓绿洲位置独特，位于天山中段博格达山、依连哈比尔尕山和婆罗科努山分水岭以北的地区，西起博乐市，东至木垒哈萨克自治县，行政区包括15个县市（图1），总面积为1.37×10^5 km^2，仅占新疆的8.22%，容纳的人口却超过新疆的25%，创造了新疆56%的GDP[21-22]。天山北麓绿洲作为新疆绿洲的重要组成部分，绿洲经济发达，人类活动剧烈，是"一带一路"战略的示范区和重点经济开发区，在当地经济结构中处于核心地位。

绿洲是受干旱区自然和人为因素双重影响的自然生态系统，比一般的生态系统更脆弱[23]。20世纪50年代以来，天山北麓绿洲面积急剧扩大，人口迅速增长，人类活动强度不断加大，资源供需矛盾进一步激发[24]，在带来经济效益的同时，生态环境也受到一定影响，草场退化、盐碱化、荒漠化、工业污染等环境问题相继出现。生态安全是天山北麓绿洲社会稳定和经济发展的基础保障，对其进行评价具有重要意义。

2 研究方法与评价指标

2.1 三维生态足迹模型

2.1.1 基础三维生态足迹模型 生态足迹能够表示人类社会对生态环境产生的压力，因而可用于区域生态安全评价。Niccolucci等[5]以Daly准则为理论基础，引入足迹广度和足迹深度两项指标，构建出基础三维生态足迹模型。相关计算公式如下：

$$EF = N \times ef = N \times \sum r_i(aa_i) \quad (1)$$

$$EC = N \times ec = 0.88 \times N \times \sum a_i r_i y_i \quad (2)$$

$$ER(ED) = EC - EF \quad (3)$$

$$EF_{size} = EC, 0 < EF_{size} \leqslant EF \quad (4)$$

$$EF_{depth} = \frac{EF}{EC} = \frac{EC + ED}{EC} = 1 + \frac{ED}{BC}, \quad EF_{depth} \geqslant 1 \quad (5)$$

$$EF_{3D} = EF_{size} \times EF_{depth}, \quad EF_{3D} = EF \quad (6)$$

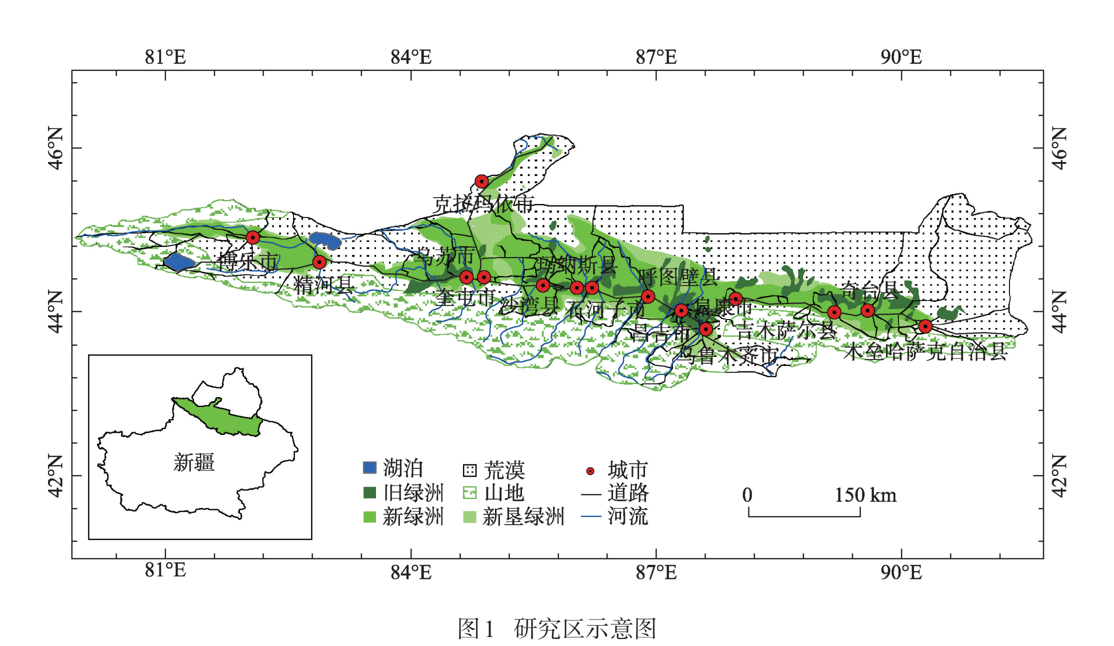


图1 研究区示意图

Fig. 1 Sketch map of the study area

ChinaXiv合作期刊

式中:EF表示生态足迹;N为人口数量;ef为人均生态足迹;r_i为i种土地类型的均衡因子;aa_i为人均占用交易商品折算后的第i类生物生产土地面积。EC表示生态承载力,依据世界环境与发展委员会建议扣除12%的生物多样性保护面积;ec为人均生态承载力;a_i为实际人均占有的第i类生物生产土地面积;y_i为i种土地类型的产量因子。当$EC > EF$时,$EC-EF=ER$表示生态盈余;当$EC < EF$时,$EC-EF=ED$表示生态赤字。EF_{size}、EF_{depth}、EF_{3D}分别表示足迹广度、足迹深度、三维生态足迹,其中1为足迹深度的自然原长。

2.1.2 *改进三维生态足迹模型* 由于生态赤字和生态盈余自然资本的性质存在差异,基础三维生态足迹模型在计算过程中容易将不同地类间生态盈余与赤字进行抵消,造成地类间的赤字转移,进而导致高估足迹广度、低估足迹深度的误差[25]。基于方恺等[11]的改进算法,可将三维生态足迹由地类水平扩展到区域水平。改进后的三维模型克服了基础三维模型在生态赤字存在转移风险、存量资本的稳定对区域发展的重要性被忽视、测算结果具有生态偏向性方面的不足。相关计算公式如下:

$$EF_{size,\ region} = \sum \min\{EF_i, EC_i\} \tag{7}$$

$$EF_{depth,\ region} = 1 + \frac{\sum \max\{EF_i - EC_i, 0\}}{\sum EC_i} \tag{8}$$

$$EF_{3D,\ region} = EF_{size,\ region} \times EF_{depth,\ region} \tag{9}$$

式中:$EF_{3D,\ region}$代表区域的三维生态足迹;$EF_{size,\ region}$代表区域的生态足迹广度;$EF_{depth,\ region}$代表区域的生态足迹深度;EF_i、EC_i分别代表第i类土地的生态足迹和生态承载力。

2.1.3 *生态足迹测算账户* 生态足迹主要包括生物资源账户和化石能源账户两类,前者主要对应耕地、林地、草地、水域、建设用地5种土地利用类型,后者主要对应能源用地。需要指出的是,WWF发布的《Living Planet Repot 2012》中将能源地定义为“用于吸收化石能源燃烧排放的温室气体所需的林地面积”[26],由于能源用地在自然系统中本不存在,因而属于虚拟用地。本文根据天山北麓绿洲的社会经济状况,尽可能完整地涵盖区域的自然资本消耗状况,构建如下生态足迹测算账户(表1)。

2.2 评价指标

2.2.1 *存量流量利用比* 在资本流量被完全占用时($EF>EC$),存量资本开始逐渐被消耗。存量流量利用比可表征人类实际利用自然资本中存量、流量所占的份额[27],其计算公式为:

$$f_{flow}^{stock} = \frac{EF - EF_{size}}{EF_{size}} = EF_{depth} - 1 \tag{10}$$

2.2.2 *生态利用效率* 可以用单位生态足迹创造的GDP来测度生态利用效率[28]。EE值越小,说明单位面积的生物生产性土地生产的生物产品量越少,区域资源的利用效率越低;反之,区域的资源利用效率越高。计算公式为:

$$EE = \frac{GDP}{EF} \times 100\% \tag{11}$$

2.2.3 *生态适度人口* 用生态承载力代表一个地区所能提供的资源环境条件,生态足迹代表人口的消费水平。在生态承载力内,按一定人均生态足迹计算的人口可认为是一个区域的生态适度人口(P)[29]。计算公式为:

$$P = N \times \frac{EC}{EF} \tag{12}$$

2.3 数据来源

经济统计数据来源于2000—2016年的《新疆统计年鉴》以及此时间段内沙湾、玛纳斯、石河子、奎屯、乌鲁木齐、呼图壁、昌吉、阜康、克拉玛依、乌苏、精河、奇台、木垒、吉木萨尔、博乐15个县市的统计年鉴、国民经济和社会发展统计公报。均衡因子和产量因子是生态足迹模型的关键参数,不同研究内容采用的参数存在较大差异,由于区域气候、地形、生物生产力等不同,直接借用全球或全国的因子难以真实反映小尺度的生态状况[30-31]。因此,本文选取的参数来自于刘某承等[32-33]基于净初级生产力对新

表1 天山北麓绿洲各类土地的生物生产性账户构成

Tab. 1 Biological productive account of different land types in the northern oasis of Tianshan

土地类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	能源用地
账户目录	水稻、小麦、玉米、豆类、棉花、油菜、胡麻、葵花、甜菜、薯类、蔬菜、苜蓿、果用瓜、猪肉、禽蛋	苹果、梨、枣、葡萄、核桃、桃等林果品	羊肉、牛肉、奶制品、羊毛	鱼类、蟹类等水产品	电力	原煤、焦炭、煤油、液化石油气、天然气

chinaXiv:202012.00028v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202012.00028v1

表2 各类生物生产土地均衡因子、产量因子

Tab. 2 Equilibrium factors and yield factors for various types of biological production land

类别	耕地	林地	草地	水域	建设用地	能源用地
均衡因子	2.25	2.36	0.42	0.33	2.25	2.36
产量因子	0.74	0.97	0.54	0.54	0.74	0.00

疆均衡因子和产量因子的测算结果,具体数值见表2。

3 结果与分析

3.1 人均生态足迹与生态承载力分析

2000—2016年天山北麓绿洲的人均生态承载力和人均生态足迹均呈显著上升趋势(图2),从二者大小关系看,在上升的过程中人均生态足迹始终大于人均生态承载力,且人均生态足迹的线性斜率大于人均生态承载力的线性斜率,表明天山北麓绿洲在2000—2016年处于生态不可持续的发展状态。计算结果显示,17 a内,人均生态承载力由1.896 hm^2上升到4.924 hm^2,平均增速为0.178 $hm^2 \cdot a^{-1}$;人均生态足迹由2.481 hm^2上升到6.451 hm^2,平均增速为0.234 $hm^2 \cdot a^{-1}$。2009年以后,天山北麓绿洲人均生态足迹明显高于新疆平均水平(根据吕越等[34]的研究,新疆人均生态足迹为4.9 $hm^2 \cdot 人^{-1}$),这主要有以下3方面的原因:①“十五”计划对西部大开发战略进行了具体部署,“十一五”进一步推进西部发展,天山北麓绿洲社会经济迅速发展,对土地的需求越来越大,生态占用面积不断扩大。② 天山北麓绿洲人口众多,随着城市化进程的加快,人口进一步扩张,由2000年的4.36×10^6人增长到2016年的6.08×10^6人,对于资源的占用不断增加。③ 人口增多的同时,居民消费水平不断提高,物质需求不断增多,资源消费量随之增长,这也是导致人均生态足迹不断上升的一个重要原因。

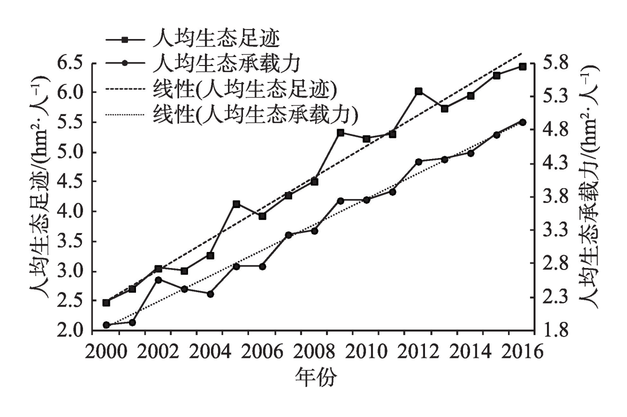


图2 2000—2016年天山北麓绿洲人均生态足迹和生态承载力

Fig. 2 Per capita ecological footprint and ecological capacity of the northern oasis of the Tianshan Mountains from 2000 to 2016

3.2 人均生态赤字分析

利用变异系数对生态赤字的相对波动程度进行分析,发现在2000—2016年天山北麓绿洲人均生态赤字的变异系数为负值,以2002年为转折点,呈“V”形曲线(图3)。2000—2002年基本呈下降趋势,而2002—2016年则基本呈上升趋势。表明天山北麓绿洲自然资源的利用程度日趋统一,内部各行政单元的生态赤字在2002年之后差异逐渐缩小。2000—2002年,天山北麓绿洲的生态不可持续内部相对差异基本呈扩大趋势,而在2002—2016年则基本呈缩小趋势。究其原因,主要是受新疆经济发展和西部大开发战略的影响,西部大开发初期凭借区位优势和相对完善的基础设施,乌鲁木齐等城市工业化发展迅速,其生态赤字远远高于其他县市[35];2002年以后地区协调发展日益受到重视,资源集约节约利用逐渐被纳入发展体系,同时以乌鲁木齐、昌吉、石河子、奎屯、克拉玛依等为主的城市带动区域经济发展,各县市之间的生态赤字差距逐渐缩小。

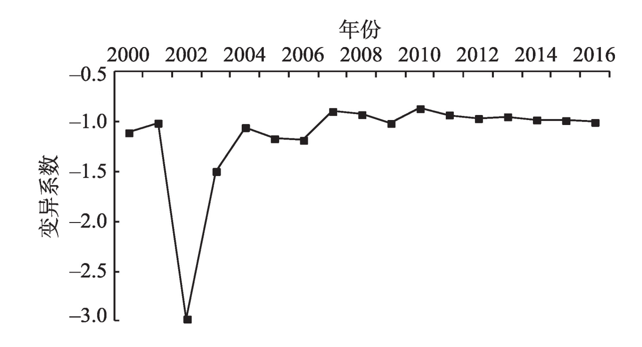


图3 2000—2016年天山北麓绿洲人均生态赤字的变异系数

Fig. 3 Coefficient of variation of per capita ecological deficit in the northern oasis of the Tianshan Mountains from 2000 to 2016

3.3 生态足迹广度和深度分析

2000—2016年,天山北麓绿洲生态足迹广度呈

ChinaXiv合作期刊

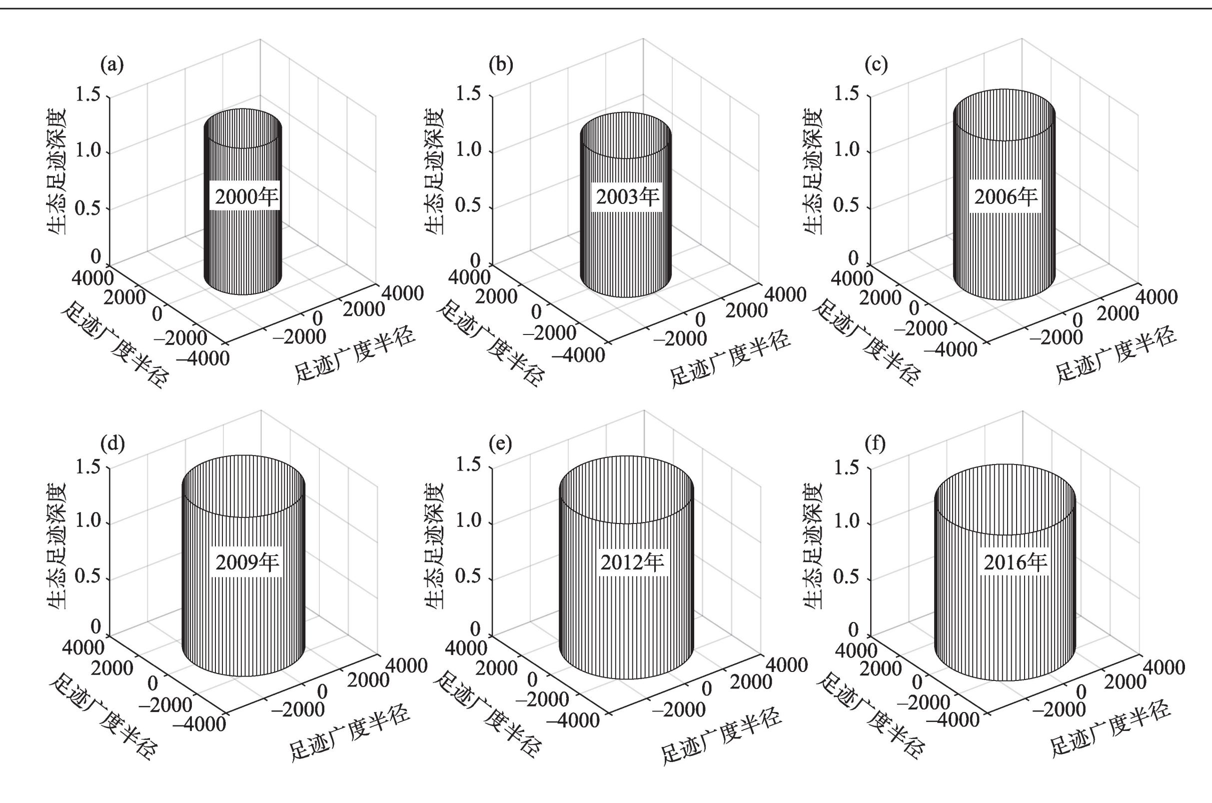


图4　2000—2016年天山北麓绿洲生态足迹广度和深度

Fig. 4　The size and depth of the ecological footprint of the northern oasis of the Tianshan Mountains from 2000 to 2016

上升趋势(图4)，表明天山北麓绿洲在经济不断发展的同时，对资源的利用强度不断加大，生态占用面积也在持续增加。17 a间，生态足迹广度由8.38×10^6 hm^2上升到2.73×10^7 hm^2，平均增速达1.11×10^6 $hm^2·a^{-1}$；生态足迹深度略有增加，但是变化并不明显，平均值为1.35，变化幅度在-15.25%～11.91%。说明天山北麓绿洲资源消费和利用结构并不合理，且不合理程度无显著变化。由公式(10)可知，存量流量利用比实际上等于足迹深度减去自然原长(值为1)，存量流量利用比在17 a内略有上升(增加了0.44%)，表明天山北麓绿洲对资源，尤其是存量资源的消耗不断增加。主要原因在于天山北麓绿洲面积狭小，资源极度有限，面对人口扩张、经济发展的现实需求，区域内的各县市逐渐开始消费存量资源。

3.4 生态利用效率和生态适度人口分析

生态利用效率是从社会经济角度衡量人类对自然资源的利用效率。2000—2016年天山北麓绿洲的生态利用效率整体上呈增加趋势(图5)。17 a增长了3.67倍，且在各年份间变化率波动较大，与全国水平变化相似[28]。表明天山北麓绿洲资源利用日趋充分，单位资源所能创造的经济价值逐渐增

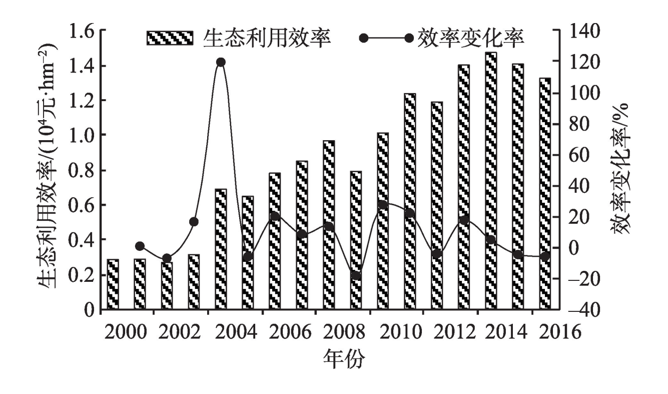


图5　2000—2016年天山北麓绿洲生态利用效率

Fig. 5　Ecological utilization efficiency of the northern oasis of Tianshan Mountains from 2000 to 2016

加。这主要得益于西部大开发以来的政策支持和产业结构调整，更多的生物生产性土地向第二和第三产业转移，但受限于自然本底，天山北麓绿洲的资本投入产出转化率较低，生态利用效率相较于我国东中部地区仍然较低。

生态适度人口是从生态角度出发，以生态安全为保障，测度区域所能供养的最佳人口数量。2000—2016年天山北麓绿洲生态适度人口呈现出波动增长趋势(图6)，说明天山北麓绿洲在区域生态承载力范围内所能供养的人口规模有所增大。17 a天山北麓绿洲的实际人口与生态适度人口平均

chinaXiv:202012.00028v1

ChinaXiv合作期刊

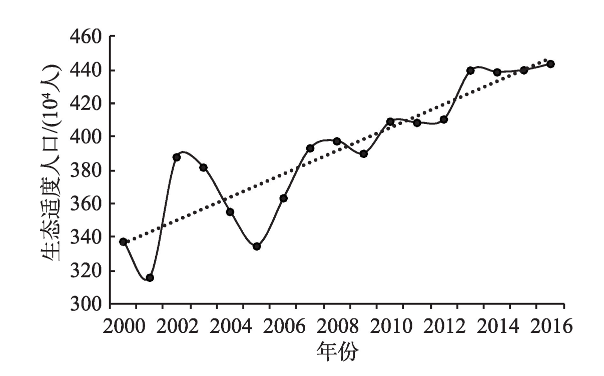


图6 2000—2016年天山北麓绿洲生态适度人口

Fig. 6 Ecosystem-appropriate population of the northern oasis of Tianshan Mountain from 2000 to 2016

比为1:0.74,过剩人口由1.04×10^6人增加到1.38×10^6人。主要原因在于随着城镇化进程的加快,天山北麓绿洲主要城市向周边地区大幅扩张,部分未利用地转变为生物生产性土地,使得生态承载力总量上升,生态适度人口增加。与此同时,人口数量的不断增多,对资源的需求和利用也在迅速增加,持续扩大的人口规模给天山北麓绿洲的生态环境造成了巨大压力。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 研究时段内,天山北麓绿洲的生态环境处于不可持续的发展状况,生态占用面积持续增加,生态安全受到严重威胁。人均生态足迹呈上升趋势,由2.481 hm^2上升到6.45 hm^2,平均增速为0.234 $hm^2\cdot a^{-1}$,且始终大于人均生态承载力。生态足迹广度也呈现上升趋势,由8.38×10^6 hm^2上升到2.73×10^7 hm^2,增加了2.25倍。

(2) 天山北麓绿洲内部生态赤字相对差异逐渐缩小,表现为人均生态赤字的变异系数(为负值)在2002年后逐渐增加,不可持续状况的相对差异逐渐缩小。

(3) 天山北麓绿洲生态利用效率整体上呈增加趋势,对于资源的利用程度日趋充分,单位资源创造的经济价值不断增加。生态利用效率17 a间增加了3.67倍,表明天山北麓绿洲生态经济系统的发展能力和资源利用效率显著提高,且在各年份变化率波动较大。

(4) 天山北麓绿洲生态适度人口呈现波动增长趋势,对区域资源的利用程度日趋充分,但生态环境仍处于不可持续状况。实际人口与生态适度人口平均比为1:0.74,严重超载的人口给生态环境造成巨大压力。

4.2 讨论

为缓解生态压力,减小生态赤字,促进天山北麓绿洲可持续发展,针对上述分析,提出以下建议:

(1) 积极调整产业结构,深度融入"一带一路"。天山北麓三次产业结构平均比为:9.30:39.64:51.06,呈现"三二一"结构,但相对粗放的产业发展方式给资源环境造成了巨大的压力[36],表现为第一产业附加值不高,缺乏精深加工,第二产业主要以资源型产业主导,矿产开采及加工、制造业比重大。在今后的发展中应进一步优化产业结构,积极推进农业现代化、新型工业化,同时应充分利用自身的地缘优势和资源优势,积极融入"一带一路"战略,拓展对外贸易,大力发展交通运输、物流仓储、高新技术、军垦文化旅游以及农副产品加工等产业,降低生态消耗和浪费[37-38]。

(2) 促进工业绿色转型,优化能源消费结构。能源足迹在天山北麓的足迹总量中占据很大比例,重化工业、火电等集中分布在该地区,能源消费居高不下,其中煤炭消费占比超过60%,工业能源消费占消费总量高达70%左右[39]。现阶段天山北麓能源利用效率偏低,能源消耗强度偏高,而受气候和地形影响,天山北麓太阳能和风能资源丰富,受生活和生产方式影响,天山北麓沼气潜力巨大。因此应积极促进工业绿色转型[40],加大清洁能源的开发利用力度,实现能源消费结构的多元化。

(3) 有序推进新型城镇化,科学控制人口规模。2016年天山北麓城镇化率达67.32%,高出全疆18.97个百分点,高速城镇化发展一方面集聚了大量的城市人口,改变了农业转移人口的消费模式,另一面加剧了土地流转,建设用地持续扩张,从而扩大了生态赤字。此外,2016年天山北麓绿洲的超载人口高达1.64×10^6人,不断增多的人口进一步加剧了绿洲面临的生态挑战。因此应稳步推进新型城镇化,提高人口素质,化人口压力为人才红利,同时也应注意根据绿洲适度规模科学控制人口数量。

本文在评价天山北麓绿洲生态安全过程中,仍存在不足之处,如本文的均衡因子和产量因子选取的是省域参数,虽然较为精确地反映了天山北麓绿洲的生态状况,但由于面积当量不同,不能与国际

chinaXiv:202012.00028v1

ChinaXiv合作期刊

数据相比较。此外,在进行生态适度人口研究时,本文仅以生态承载力和生态足迹为考虑对象,忽略了人类对于生态环境的适应能力,以及为缓解生态压力所做出的积极努力。在今后的研究中,应构建与研究区域相符合的社会适应性能力指标[41],以便更加充分、真实地测度生态适度人口。

参考文献(References):

[1] 王晓玉, 冯喆, 吴克宁, 等. 基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护与修复[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8725-8732. [Wang Xiaoyu, Feng Zhe, Wu Kening, et al. Ecological conservation and restoration of life community theory based on the construction of ecological security pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8725-8732.]

[2] 党小虎, 吴彦斌, 刘国彬, 等. 生态建设15年黄土高原生态足迹时空变化[J]. 地理研究, 2018, 37(4): 761-771. [Dang Xiaohu, Wu Yanbin, Liu Guobin, et al. Spatial-temporal changes of ecological footprint in the Loess Plateau after ecological construction between 1995 and 2010[J]. Geographical Research, 2018, 37(4): 761-771.]

[3] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying calcify: What urban economics leaves out[J]. Environment and Urbanization, 1992, 4: 121-130.

[4] Wackernagel M, Rees W E. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth[M]. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.

[5] Niccolucci V, Bastianoni S, TiezziE B P, et al. How deep is the footprint? A 3D representation [J]. Ecological Modelling, 2009, 220 (20): 2819-2823.

[6] 方恺. 生态足迹深度和广度: 构建三维模型的新指标[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 267-274. [Fang Kai. Ecological footprint depth and size: New indicators for a 3D model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(1): 267-274.]

[7] 朱文博, 李双成, 朱连奇. 中国省域生态系统服务足迹流动及其影响因素[J]. 地理研究, 2019, 38(2): 337-347. [Zhu Wenbo, Li Shuangcheng, Zhu Lianqi. Ecosystem service footprint flow and the influencing factors within provinces, China[J]. Geographical Research, 2019, 38(2): 337-347.]

[8] 杨屹, 樊明东. 中国丝绸之路经济带沿线省份生态足迹时空差异及公平性分析[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5040-5050. [Yang Yi, Fan Mingdong. Analysis of spatial and temporal differences and equity of ecological footprints of provinces along the Silk Road Economic Belt in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (14): 5040-5050.]

[9] 王淑新, 何红, 李双, 等. 中国旅游足迹家族研究进展[J]. 自然资源学报, 2019, 34(2): 424-436. [Wang Shuxin, He Hong, Li Shuang, et al. Research progress of tourism footprint family in China [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(2): 424-436.]

[10] Yang Y, Meng G. A bibliometric analysis of comparative research on the evolution of international and Chinese ecological foot print research hotspots and frontiers since 2000[J]. Ecological Indicators, 2019(12): 650-665.

[11] 方恺, 高凯, 李焕承. 基于三维生态足迹模型优化的自然资本利用国际比较[J]. 地理研究, 2013, 32(9): 1657-1667. [Fang Kai, Gao Kai, Li Huancheng. International comparison of natural capital use: A three-dimensional model optimization of ecological footprint[J]. Geographical Research, 2013, 32(9): 1657-1667.]

[12] 靳相木, 柳乾坤. 基于三维生态足迹模型扩展的土地承载力指数研究——以温州市为例[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 2982-2993. [Jin Xiangmu, Liu Qiankun. Analysis of a land carrying capacity index based on an expanded three-dimensional ecological footprint model: A case study of Wenzhou[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 2982-2993.]

[13] Chen G, Li Q, Peng F, et al. Henan ecological security evaluation using improved 3D ecological footprint model based on emergy and net primary productivity[J]. Sustainability, 2019, 11: 1353.

[14] 何珍珍, 王宏卫, 杨胜天, 等. 塔里木盆地中北部绿洲生态安全评价[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 963-970. [He Zhenzhen, Wang Hongwei, Yang Shengtian, et al. Evaluation on oasis ecological security in the central-northwest part of the Tarimbasin[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(4): 963-970.]

[15] 陈蓓. 基于生态足迹模型的川西南高原地区生态安全评价——以甘孜藏族自治州为例[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(6): 185-190. [Chen Bei. Evaluation of ecological security in plateau areas of southwest Sichuan based on ecological footprint model: A case study of Ganzi Tibetan Autonomous Prefecture[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40 (6): 185-190.]

[16] 魏黎灵, 李岚彬, 林月, 等. 基于生态足迹法的闽三角城市群生态安全评价[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4317-4326. [Wei Liling, Li Lanbin, Lin Yue, et al. Evaluation of the ecological security of urban agglomeration on Min Delta based on ecological footprint[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4317-4326.]

[17] 冯芳, 金爽, 黄巧华, 等. 基于能值-生态足迹模型的湖北省生态安全评价[J]. 冰川冻土, 2018, 40(3): 634-642. [Feng Fang, Jin Shuang, Huang Qianhua, et al. Ecological security assessment of Hubei Province based on the emergy-ecological footprint model[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(3): 634-642.]

[18] 罗海平, 邹楠, 潘柳欣, 等. 生态足迹视域下中国粮食主产区粮食生产安全态势的时空属性研究: 2007-2025[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(6): 1468-1475. [Luo Haiping, Zou Nan, Pan Liuxin, et al. Research on temporal and spatial attribute of food production security state in Chinese major grain regions under the horizon of ecological footprint: 2007-2025[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2019, 35(6): 1468-1475.]

[19] 刘秀丽, 郭丕斌, 张勃, 等. 采煤与脆弱生态复合区生态安全评价——以山西为例[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 677-685. [Liu Xiuli, Guo Pibin, Zhang Bo, et al. Evaluation on ecological securi-

chinaXiv:202012.00028v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202012.00028v1

ty of coal mining and fragile ecological compound area: A case study in Shanxi Province[J].Arid Zone Research, 2018, 35(3): 677–685.]

[20] 杨晓俊, 方传珊, 侯叶子. 基于生态足迹的西安城市生态游憩空间优化研究[J]. 地理研究, 2018, 37(2): 281–291. [Yang Xiaojun, Fang Chuanshan, Hou Yezi. Optimization of ecological recreation area in Xi'an city based on ecological footprint[J]. Geographical Research, 2018, 37(2): 281–291.]

[21] 张芳, 熊黑钢, 冯娟, 等. 天山北麓新人工绿洲扩张过程中的碳库格局变化与碳库迁移[J]. 生态学报, 2017, 37(23): 7862–7871. [Zhang Fang, Xiong Heigang, Feng Juan, et al. Changes in the carbon pool pattern and carbon pool migration during the expansion of new artificial oases in the northern foothills of Tianshan Mountains within the last 40 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(23): 7862–7871.]

[22] 邓铭江. 三层级多目标水循环调控理论与工程技术体系[J]. 干旱区地理, 2019, 42(5): 961–975. [Deng Mingjiang. System of three-scale multi-objective water cycle regulation theory and engineering technology[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(5): 961–975.]

[23] 常学礼, 李秀梅, 白雪莲, 等. 荒漠绿洲交错区景观稳定性与维持机制[J]. 中国沙漠, 2020, 40(3): 1–8. [Chang Xueli, Li Xiumei, Bai Xuelian, et al. Landscape stability and maintaining mechanism in desert-oasis ecotone[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(3): 1–8.]

[24] 宋文杰, 张清, 刘莎莎, 等. 基于LUCC的干旱区人为干扰与生态安全分析——以天山北坡经济带绿洲为例[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 235–242. [Song Wenjie, Zhang Qing, Liu Shasha, et al. LUCC-based human disturbance and ecological security in arid area: A case study in the economic zone on northern slope of the Tianshan Mountains[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 235–242.]

[25] 方恺. 基于改进生态足迹三维模型的自然资本利用特征分析——选取11个国家为数据源[J]. 生态学报, 2015, 35(11): 3766–3777. [Fang Kai. Assessing the natural capital use of eleven nations: An application of a revised three-dimensional model of ecological footprint[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(11): 3766–3777.]

[26] 朱兆红, 李莉, 童亿勤, 等. 舟山群岛新区生态足迹与可持续发展评价研究[J]. 生态科学, 2018, 37(5): 122–130. [Zhu Zhaohong, Li Li, Tong Yiqin, et al. Study on ecological footprint and sustainable development in Zhoushan Archipelago New District [J]. Ecological Science, 2018, 37(5): 122–130.]

[27] 秦超, 李君轶, 陈宏飞, 等. 基于三维生态足迹的陕西省自然资本动态研究[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 837–842. [Qin Chao, Li Junyi, Chen Hongfei, et al. Dynamics of natural capital in Shaanxi Province based on the three-dimensional ecological footprint[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(4): 837–842.]

[28] 史丹, 王俊杰. 基于生态足迹的中国生态压力与生态效率测度与评价[J]. 中国工业经济, 2016(5): 5–12. [Shi Dan, Wang Junjie. Measurement and evaluation of China's ecological pressure and ecological efficiency based on ecological footprint[J]. China Industrial Economics, 2016(5): 5–12.]

[29] 何鑫, 田丽慧, 毛凌琳. 生态足迹模型下的人口适度规模研究——以常德市为例[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(4): 54–64. [He Xin, Tian Lihui, Mao Linglin. Study on optimum population based on ecological footprint model: A case study of Changde City[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(4): 54–64.]

[30] 李金城, 严长安, 高伟. 基于本土参数的流域生态足迹评估与不确定分析[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 1–8. [Li Jincheng, Yan Changan, Gao Wei. Estimating ecological footprint at the watershed scale with uncertainty analysis based on local parameters[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 1–8.]

[31] 郭慧, 董士伟, 吴迪, 等. 基于生态系统服务价值的生态足迹模型均衡因子及产量因子测算研究[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1–8. [Guo Hui, Dong Shiwei, Wu Di, et al. Calculation and analysis of equivalence factor and yield factor of ecological footprint based on ecosystem services value[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1–8.]

[32] 刘某承, 李文华. 基于净初级生产力的中国各地生态足迹均衡因子测算[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(5): 401–406. [Liu Moucheng, Li Wenhua. Calculation of equivalence factor used in ecological footprint for China and its provinces based on net primary production[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(5): 401–406.]

[33] 刘某承, 李文华, 谢高地. 基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算[J]. 生态学杂志, 2010, 29(3): 592–597. [Liu Moucheng, Li Wenhua, Xie Gaodi. Estimation of China ecological footprint production coefficient based on net primary productivity [J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(3): 592–597.]

[34] 吕越, 陈忠清. 能值生态足迹改进模型研究——以新疆为例[J]. 干旱区地理, 2016, 39(5): 1120–1127. [Lyu Yue, Chen Zhongqing. Improved model of emergy ecological footprint: A case study of Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(5): 1120–1127.]

[35] 童小芹, 张庆红, 夏咏, 等. 乌鲁木齐市生态足迹分析[J]. 干旱区研究, 2013, 30(4): 757–763. [Tong Xiaoqin, Zhang Qinghong, Xia Yong, et al. The ecological footprint in Urumqi[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(4): 757–763.]

[36] 张风丽. 资源环境约束下新疆产业转型路径研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2016. [Zhang Fengli. Research on the Road of Transformation of Xinjiang under the Restriction of Resource and Environment[D]. Shihezi: Shihezi University, 2016.]

[37] 聂莹, 刘清杰, 孙素芬. 经济全球化能够有效抑制"一带一路"沿线国家的生态足迹吗?——来自动态门槛面板模型的经验证据[J]. 自然资源学报, 2019, 34(2): 301–311. [Nie Ying, Liu Qingjie, Sun Sufen. Does economic globalization effectively inhibit the ecological footprint of countries along "The Belt and Road"?: Empirical evidence from the dynamic threshold panel model[J].

ChinaXiv合作期刊

Journal of Natural Resources, 2019, 34(2): 301-311.]

[38] 郝林钢, 左其亭, 韩春辉, 等. "一带一路"沿线分区用水结构与产业结构的分析比较[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 44-51. [Hao-Lingang, Zuo Qiting, Han Chunhui, et al. Water consumption and industrial structure in different regions along the "Belt and Road" [J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 44-51.]

[39] 李小平. 新疆工业绿色转型升级面临的挑战及对策建议[J]. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版), 2018, 39(5): 137-144. [Li Xiaoping. Challenges of green economic transformation and industrial upgrading in Xinjiang and suggested resolutions[J]. Journal of Xinjiang Normal University(Edition of Philosophy and Social Sciences), 2018, 39(5): 137-144.]

[40] 周旭东, 吕光辉. 基于超效率DEA模型的干旱区工业生态效率研究——以新疆为例[J]. 干旱区研究, 2019, 36(2): 513-519. [Zhou Xudong, Lyu Guanghui. Industrial eco-efficiency in arid region vased on super-efficiency DEA model: A case study in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(2): 513-519.]

[41] 李鹏辉, 米桃桃, 高素芳, 等. 基于水足迹理论的玛纳斯河流域水资源评价[J]. 人民长江, 2019, 50(8): 103-108. [Li Penghui, Mi Taotao, Gao Sufang, et al. Water resources assessment of Manas River Basin based on water footprint theory[J]. Yangtze River, 2019, 50(8): 103-108.]

Ecological security evaluation of an oasis in the north of the Tianshan Mountains based on three-dimensional ecological footprint model

LI Peng-hui[1], XU Li-ping[1], LIU Xiao[1], WU Pin-ru[2]

(1. *Shihezi University, Shihezi* 832000, *Xinjiang, China;* 2. 130 *Group Complete Middle School, Kuitun* 833200, *Xinjiang, China*)

Abstract: We used an improved three-dimensional ecological footprint model to evaluate the ecological security of the northern oasis of the Tianshan Mountains from 2000 to 2016. The results show that (1) from 2000 to 2016, the overall ecological environment of the northern oasis of the Tianshan Mountains is in an unsustainable state of development, and the ecological footprint continues to increase. The ecological footprint has increased from 8.38×10^6 hm^2 to 2.73×10^7 hm^2 with an average growth rate of 1.11×10^6 $hm^2\cdot a^{-1}$. Ecological security is seriously threatened. (2) After 2002, the relative disparities in the unsustainability of the northern oasis of the Tianshan Mountains gradually decreased, and the relative differences in the ecological deficits of the internal administrative units gradually narrowed. (3) The ecological utilization efficiency of the northern oasis of the Tianshan Mountains as a whole has shown an increasing trend, which has tripled in 17 years. The degree of utilization of resources has become more and more abundant, and the economic value created by unit resources has continuously increased. However, the rate of change in each year has fluctuated dramatically, and the fluctuation range is between −18.23% and 120.84%. (4) Although the ecologically moderate population of the Tianshan Mountains' northern oasis shows a fluctuating growth trend, the demand for and use of resources are also increasing rapidly, and the continuously growing population has caused tremendous pressure on the ecological environment. Finally, some suggestions were put forward to ease the ecological pressure, reduce the ecological deficit, and promote the sustainable development of the northern oasis of the Tianshan Mountains.

Keywords: three-dimensional ecological footprint; oasis; ecological security; Tianshan northern foot

chinaXiv:202012.00028v1